

Modélisation de la fissuration par fatigue des connexions poutres-colonnes de grands bâtiments en armatures en acier lors de tremblements de terre

Cédric Lequesne, André Plumier et Anne-Marie Habraken

Département M&S, Université de Liège 1, Chemin des Chevreuils 4000 Liège Belgique

Résumé : De nombreux bâtiments à structures métalliques ont subi des ruptures par fatigue au niveau des connexions poutres-colonnes lors de séismes. Pour déterminer le lieu et le moment de l'initiation de la fissuration, un modèle d'endommagement continu dans un calcul éléments finis est proposé. La propagation est ensuite modélisée par un modèle de types « zones cohésives ». Les contraintes résiduelles sont prises en compte dans cette modélisation.

Abstract : Many steel frame buildings have cracked in beam-to-column connections during earthquakes. To determine the place and the moment of the crack initiation, a model of continuous damage is used in a finite element computation. Cohesive zones model predicts the propagation. The residual stresses are evaluated before.

Mots clés : fatigue, zones cohésives, connexions poutres-colonnes, rupture

1 Introduction

Lors des séismes de Northridge et de Kobe, les connexions poutres-colonnes de bâtiments métalliques ont subi des ruptures fragiles aux niveaux des soudures des semelles des poutres sur la colonne contrairement à ce qui était attendu. Ces connexions auraient dû être capables de supporter plusieurs cycles de grandes déformations non élastiques. Par conséquent des essais de taille réelle sont réalisés sur ce type de connexion. Vu leur coût, il est nécessaire de compléter ces essais par des simulations numériques par éléments finis validées par les essais réalisés.

Le but de cette étude est de modéliser par éléments finis le processus de fissuration par fatigue des soudures lors des essais cycliques à grande échelle. Cette étude s'effectue en trois étapes selon la FIG. 1.

La première étape consiste à évaluer les contraintes résiduelles générées par le procédé de soudage. Elles influencent fortement le comportement en fatigue des soudures et le chemin de fissuration normal aux contraintes internes principales maximales. Elles sont calculées par une simulation thermomécanique comme Wen, Church et Parker [1].

Ensuite le processus de rupture est composé de deux étapes qui sont l'amorçage et la propagation. L'amorçage est analysé par le modèle d'endommagement continu de Lemaître et Chaboche [2] qui consiste à calculer l'évolution d'une variable d'endommagement dépendant du chargement et du matériau. Connaissant les contraintes résiduelles, la variable d'endommagement est calculée dans chaque élément du maillage. Le lieu de l'amorçage de la fissure et la vie de la structure sont estimés lorsque la variable d'endommagement atteint une valeur critique.

Enfin la propagation des fissures est étudiée par un modèle de zone cohésive. C'est une méthode énergétique. En effet des contraintes cohésives, apparaissant sur les faciès des ruptures, suivent une loi de comportement dépendant de l'ouverture de la fissure de façon à ce que l'énergie libérée corresponde à la création de nouvelles surfaces et aux phénomènes de micro-endommagement présents derrière l'ouverture de fissure. Les éléments interfaces de rupture sont introduits dans le maillage suivant les chemins déterminés à partir des calculs précédents. Le troisième calcul modélise tout le processus de fissuration, amorçage et propagation, prenant en compte l'endommagement par fatigue.

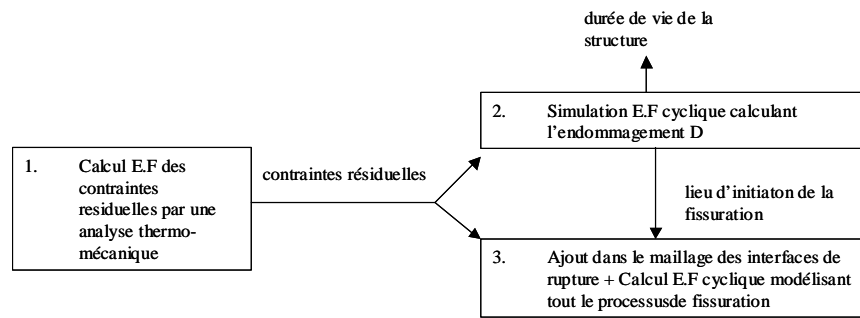


FIG. 1 - Organigramme de l'analyse de la fissuration des soudures de connexions poutres-colonnes

2 Description de la connexion

La structure étudiée est la connexion d'une poutre sur une colonne d'un bâtiment de grandes dimensions. Elle est décrite sur la FIG. 2. Les soudures se trouvent entre les semelles de la poutre et la semelle de la colonne. Sur la terminaison de l'âme de la poutre, il y a deux trous qui permettent d'accéder à l'emplacement de la soudure. De plus une barre est placée en dessous de chaque emplacement de la soudure pour maintenir la poutre lors du soudage et fortifier la connexion. L'ouverture de l'emplacement de la soudure est entre 30 et 45°. Le soudage se réalise sur plusieurs couches et génère des contraintes résiduelles. Ainsi la structure est constituée de trois matériaux : l'acier constituant la poutre et la colonne (métal de base), l'acier d'apport pour la soudure et la zone thermiquement affecté puisque le métal de base est modifié localement autour de la soudure suite au gradient de température.

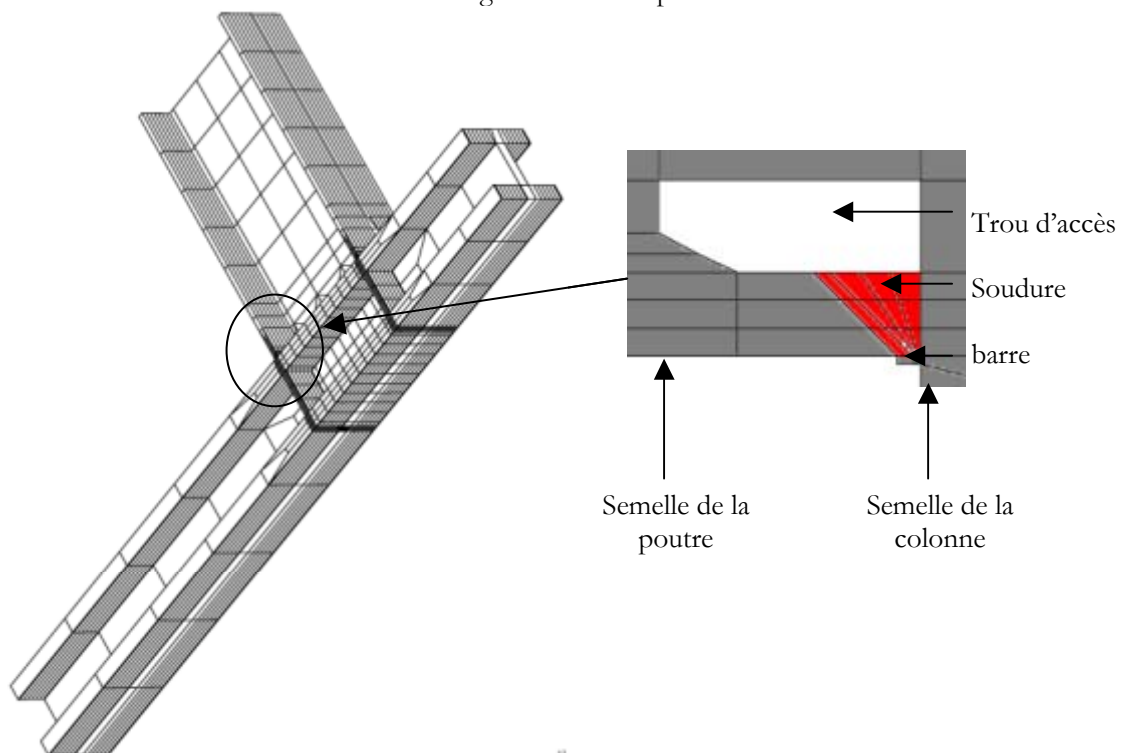


FIG. 2 - Maillage d'une poutre-colonne connecté par une soudure avec grossissement de la soudure

3 Modèle d'amorçage et de propagation de la fissuration par fatigue

3.1 Le modèle d'endommagement en fatigue

Ce modèle permet de prévoir le nombre de cycles nécessaires pour amorcer une fissure et sa position. La variable d'endommagement D est le rapport de la surface endommagée sur la surface intacte. Pour prendre en compte le caractère tensoriel des contraintes, une surface de charge en fatigue f_D comme en plasticité est définie (critère de Sines [2]). L'endommagement commence à partir du moment où f_D devient positif.

$$f_D = A_{II} - A_{II}^* \quad (1)$$

$$A_{II} = \frac{1}{2} \sqrt{(S_{ijM} - S_{ijm})(S_{ijM} + S_{ijm})} \quad (2)$$

$$A_{II}^* = \sigma_0 (1 - 3b \bar{\sigma}_H) \quad (3)$$

$$S_{ij} = \sigma_{ij} - \sum_k \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_H = \frac{1}{3} \text{Moy}_i \text{Tr}(\underline{\underline{\sigma}}) \quad (5)$$

S_{ijM} et S_{ijm} sont respectivement les composantes déviatoriques maximales et minimales du tenseur des contraintes au cours d'un cycle et σ_H est la contrainte moyenne hydrostatique. La loi d'évolution de l'endommagement en fatigue est celle de Lemaître et Chaboche [2]. Elle dépend de la contrainte maximale calculée dans A_{II} et de la contrainte moyenne σ_H . M_0 , b , a , β sont des paramètres matériaux. D_c est la limite de fatigue avant amorçage de la rupture et σ_u est la contrainte de rupture sous un chargement monotone. σ_0 est la contrainte limite avant endommagement sous un chargement cyclique avec une contrainte moyenne nulle.

$$\frac{\partial D}{\partial N} = \begin{cases} 0 & \text{si } f_D < 0 \\ D_c \left[1 - (1 - D)^{\beta+1} \right]^\alpha \left(\frac{\tilde{A}_{II}}{M} \right) & \text{si } f_D \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\tilde{A}_{II} = \frac{A_{II}}{1 - D} \quad (7)$$

$$M = M_0 (1 - 3b \bar{\sigma}_H) \quad (8)$$

$$\alpha = 1 - a \left[\frac{A_{II} - A_{II}^*}{\sigma_u - \sigma_{eqM}} \right] \quad (9)$$

σ_{eqM} est le maximum observé au cours d'un cycle du second invariant des contraintes.

Pour le calcul élément finis, la variable d'endommagement, D , est calculée par cycle au niveau des points d'intégration à partir des contraintes sur le cycle. Le nombre de cycles restant limités avant l'apparition de la rupture par fatigue, il est raisonnable de les modéliser. Remarquons qu'il s'agit d'un modèle d'endommagement non couplé dans lequel le comportement mécanique n'est pas affecté par la variable D . Ce choix assure la robustesse numérique de l'approche tant en conservant un calcul éléments finis classique [3].

3.2 Analyse de la propagation

3.2.1 Présentation du modèle cohésif

Le modèle de zone cohésive n'utilise pas de critère de rupture au sens de la mécanique de la rupture. Il décrit la résistance à la propagation de fissure par l'énergie dissipée due à la détérioration progressive du matériau et à la création de nouvelles surfaces. Cette énergie est calculée à partir de la loi (effort-séparation) observé au niveau de la rupture comme décrit sur la FIG. 3 et la FIG. 4.

Xu et Needleman [4] proposent un modèle exponentiel à deux dimensions qui sera étendu par la suite à trois dimensions :

$$\begin{aligned}
T_t &= \left(\frac{\phi_n}{\delta_n} \right) \left(\frac{2\delta_n}{\delta_t} \right) \frac{\Delta u_t}{\delta_t} \left\{ q + \left(\frac{\Delta u_n}{\delta_n} \right) \left[\frac{r-q}{r-1} \right] \right\} \exp \left(-\frac{\Delta u_n}{\delta_n} \right) \exp \left(-\frac{\Delta u_t^2}{\delta_t^2} \right) \\
T_n &= -\frac{\phi_n}{\delta_n} \exp \left(-\frac{\Delta u_n}{\delta_n} \right) \left\{ \frac{\Delta u_n}{\delta_n} \exp \left(-\frac{\Delta u_t^2}{\delta_t^2} \right) + \left(\frac{1-q}{r-1} \right) \left(1 - \exp \left(-\frac{\Delta u_t^2}{\delta_t^2} \right) \right) \left(r - \frac{\Delta u_n}{\delta_n} \right) \right\} \\
\Delta u &= \frac{\Delta u_n}{\Delta u_t} \quad T_{CZ} = \frac{T_n}{T_t}
\end{aligned} \tag{10}$$

Constantes du matériau : $\phi = \sqrt{\frac{e}{2}} \tau_{\max} \delta_t$; $\phi_n = \sigma_{\max} e \delta_n$; $r = \frac{\Delta u_n^*}{\delta_n}$; $q = \frac{\phi}{\phi_n}$; $e = \exp(1)$

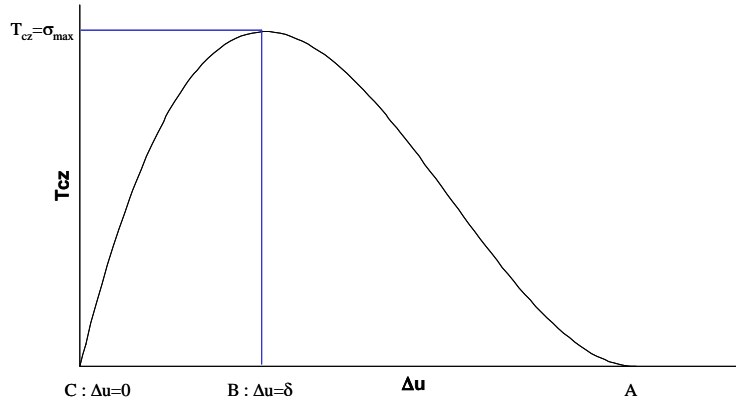


FIG. 3 - Courbe unidimensionnelle de la loi $T_{cz}=f(\Delta u_n)$

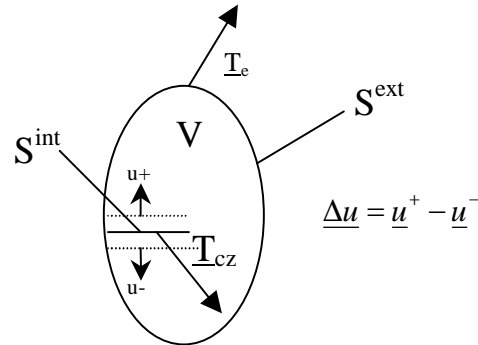


FIG. 4 - Volume comportant une zone cohésive

T_n et T_t sont les contraintes normales et de cisaillement. Δu_n et Δu_t sont les séparations normales et tangentielles entre les deux faciès de rupture. σ_{\max} et τ_{\max} sont les valeurs maximales respectivement de T_n et T_t . δ_n et δ_t sont les valeurs correspondantes de Δu_n et Δu_t . ϕ_n et ϕ_t sont les énergies libérées par le processus de rupture calculées à partir de la surface en dessous de la courbe. Elles sont équivalentes aux énergies mesurées G lors des essais de rupture. Δu_n^* est la valeur de Δu_n après complète séparation en cisaillement pour un effort normal nul. Dans de nombreuses études, ce paramètre est considéré nul [5]. Le nombre de paramètres de ce modèle reste limité et ils pourront donc être identifiés à partir des essais matériaux disponibles.

3.2.2 Couplage avec l'endommagement par fatigue

Cependant l'énergie libérée (définie par (10)) ne prend pas en compte l'endommagement cyclique. Ainsi l'énergie nécessaire à la rupture cyclique est moindre que pour une rupture monotone. Par conséquent la contrainte maximale est modifiée de telle façon que :

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\max,0}(1-D) \text{ et } \tau_{\max} = \tau_{\max,0}(1-D) \tag{11}$$

$\sigma_{\max,0}$ et $\tau_{\max,0}$ sont les contraintes maximales sans endommagement par fatigue. D est la variable d'endommagement par fatigue qui suit la loi d'évolution décrite précédemment. L'influence de l'endommagement par fatigue est présentée sur la FIG. 5.

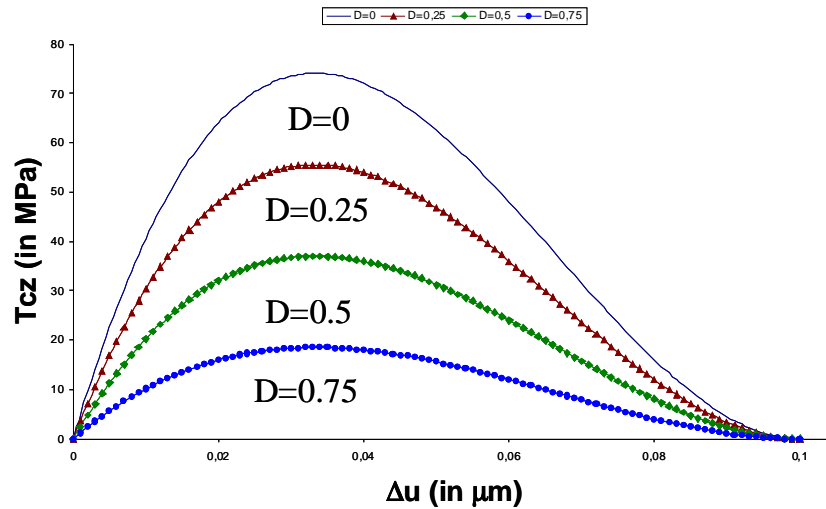


FIG. 5 - Influence de l'endommagement sur la loi de comportement de la zone d'équilibre

3.2.3 Implémentation dans un code éléments finis 2D

Cet élément est en cours de validation dans le code éléments finis non-linéaire Lagamine développé au Département M&S [6]. Les éléments appelés CZMEL modélisant la zone cohésive sont des éléments d'interface reliés à un élément solide de type mixte 2D nommé BLZ2D [7] défini par quatre nœuds et un point d'intégration. Les CZMEL sont placés à l'endroit d'une fissure potentielle déterminée (cf. FIG. 6) par l'analyse des contraintes résiduelles (étape 1) et de la fatigue (étape 2). A chaque élément d'interface est associé un élément de fondation placé sur l'élément solide assurant la continuité en l'absence de fissures (cf. FIG. 6). Cette fondation permet de déterminer s'il y a le contact ou non et de calculer la séparation entre les deux faciès de la fissure. Par conséquent, les contraintes cohésives, par la relation (10) peuvent être calculées aux points d'intégration du CZMEL. La variable d'endommagement par fatigue D est évaluée dans les éléments BLZ2D comme lors de l'analyse précédente (cf. section 3.1) et est extrapolée à l'élément CZMEL.

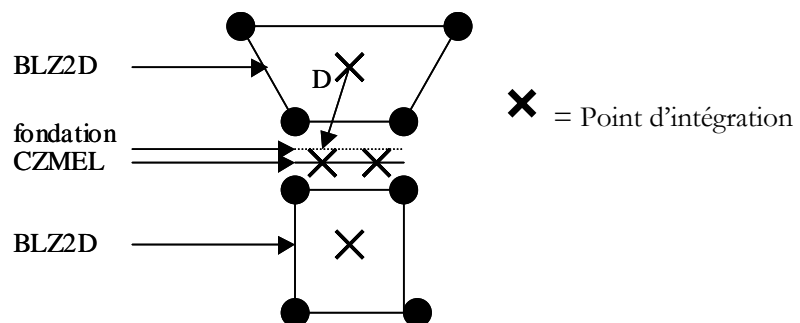


FIG. 6 - Description du modèle cohésif

3.2.4 Validation académique du modèle

Cet élément a été programmé dans le code Lagamine. Des modélisations d'expériences de ruptures seront réalisées pour valider le modèle. Un premier calcul académique a été effectué. La simulation consiste à un barreau en acier encasté subissant un effort cyclique sinusoïdal sur son autre extrémité. A la fin de l'essai, une fissure apparaît bien à la base. Les paramètres du modèle ont été déterminés à l'aide de l'ouvrage de Lemaître et Chaboche [2].

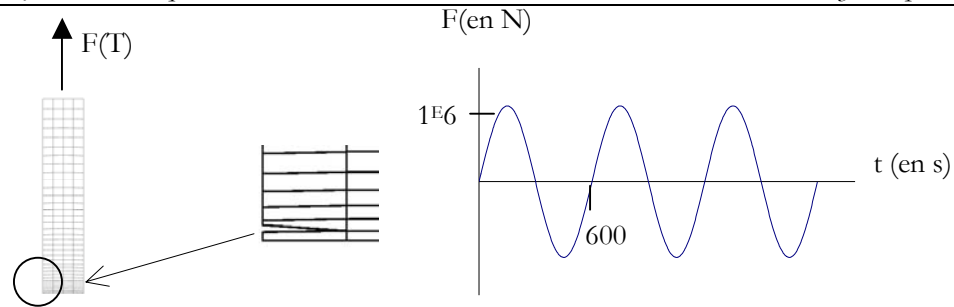


FIG. 7 - Simulation d'un essai de traction cyclique sur un barreau avec une zone cohésive

4 Conclusion

Le modèle de cette étude a été choisi et programmé dans une approche à deux dimensions. Il permet d'analyser tout le processus de fissuration. Le modèle d'endommagement choisi a l'avantage de prendre en compte le caractère tensoriel au contraire de Manson-Coffin [8] et [9]. Cet endommagement résulte de l'état de contrainte du matériau mais n'affecte pas les caractéristiques mécaniques. Les problèmes numériques apparaissant pour un matériau adoucissant sont donc évités. Enfin le modèle de zones cohésives est exploité par la propagation des fissures afin de conserver un bilan énergétique correct contrairement aux approches classiques locales de l'endommagement couplé [10]. Les approches non locales avec endommagement élastoplastique ont été écartées suite à la lourdeur de leur développement et leur robustesse parfois limitée.

Les outils sont en cours de développement tout comme les essais de tailles réelles qui sont réalisés à l'université de Karlsruhe. Ainsi le modèle sera calibré et validé à partir des simulations de ces essais.

Remerciements

Ce travail a pu être réalisé grâce à l'aide financière de la Communauté Européenne (projet VERAPS n° RFS-CR-03035) et à la bonne coopération des divers partenaires (Corus, ISQ, Université de Karlsruhe). Anne-Marie Habraken, Maître de recherche au FNRS, remercie également cet organisme.

Références

- [1] S.W. Wen, S. Church, V. Parker, Finite element modeling of weld residual stress, distortion and HAZ microstructure, document de Corus, Research, Development & Technology Swinden Technology Centre, Moorgate, Rotherham, England, S60 3AR.
- [2] J. Lemaître et J.L. Chaboche, Mécanique des matériaux solides, édition 2 Dunod, 1996.
- [3] Xikui Li, S. Cescotto, A mixed element method in gradient plasticity for pressure dependent materials and modelling of strain localisation, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 144, pp. 287-305, 1997.
- [4] X.P. Xu, A. Needleman, Numerical simulation of fast crack growth in brittle solids, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, vol. 42, pp. 1397-1434, 1994.
- [5] K. L. Roe T. Siegmund, An irreversible cohesive zone model for interface fatigue crack growth simulation, Engineering Fracture Mechanics, volume 70, Issue 2, pp. 209-232, 2003.
- [6] K.P.Li, S. Cescotto, A.M. Habraken, Numerical simulations and benchmarks of 3-D sheet metal forming using Lagamine program, Numiform'95, Simulation of Materials Processing: Theory, Methods and Applications. Ed. Shen & Dawson, Balkema, 749-754, 1995.
- [7] Y.Y. Zhu, S. Cescotto, Unified and mixed formulation of the 4-node quadrilateral elements by assumed strain method: Application to thermomechanical problems, International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol. 38, pp. 685-716, 1995.
- [8] L.F. Coffin JR., A study of effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal, Trans ASME, vol. 76, pp. 931-950, 1954.
- [9] S.S. Manson, Behavior of material under condition of thermal stress, Proceedings of heat Transfer Symposium, Engineering Research Institute of Michigan, pp. 9-35, Michigan.
- [10] A.M. Habraken, Contributions to constitutive laws of metals : micro-macro and damage models Part C Damage models applied to metals, Thèse pour l'obtention du grade d'agréé de l'enseignement supérieur, Université de Liège 2001.